

6-BA 处理对采后西兰花呼吸途径及能量水平的影响

赵素平^{1,2}, 刘红艳^{1,2}, 胡花丽¹, 张雷刚¹, 罗淑芬¹, 胡博然², 李鹏霞¹

(1. 江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014) (2. 扬州大学旅游烹饪学院, 江苏扬州 225127)

摘要: 为了研究 6-苄氨基嘌呤 (6-BA) 处理对采后西兰花呼吸途径及其能荷水平的影响, 本试验以清水浸泡为对照, 以 30 mg/L 6-BA 浸泡为处理, 在 (15±1) °C, 相对湿度 90%~95% 的条件下, 研究了 6-BA 处理对采后西兰花外观品质, 总呼吸强度, 呼吸途径如三羧酸循环途径 (TCA)、磷酸戊糖途径 (PPP)、细胞色素 (CP) 途径和交替途径 (AP) 的改变, 超氧阴离子 ($O_2^{\cdot-}$) 的积累, 一磷酸腺苷 (AMP)、二磷酸腺苷 (ADP)、三磷酸腺苷 (ATP) 含量及能荷的影响。结果表明, 6-BA 处理延缓了西兰花褪绿黄化, 可显著降低采后西兰花的总呼吸强度、CP 和 PPP 的活性, 提高了 AP 的表达量。另外, 在贮藏后期 (6~10 d), 6-BA 处理降低了西兰花组织 TCA 运行比例, 促进了采后西兰花组织内 ATP 含量的积累及延缓能荷值的下降, 从而抑制了组织内 $O_2^{\cdot-}$ 的积累。因此, 6-BA 处理对采后西兰花衰老的抑制作用可能与其对组织呼吸途径的调控及能量平衡的维持有关。

关键词: 西兰花; 6-BA; 呼吸途径; 能量水平

文章编号: 1673-9078(2017)5-141-147

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.5.023

Effect of 6-Benzylaminopurine on the Respiratory Pathway and Energy Level in Postharvest Broccoli

ZHAO Su-ping^{1,2}, LIU Hong-yan^{1,2}, HU Hua-li¹, ZHANG Lei-gang¹, LUO Shu-fen¹, HU Bo-ran², LI Peng-xia¹

(1. Institute of Agro-product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

(2. School of Tourism and Culinary Science, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: To explore the effect of 6-benzylaminopurine (6-BA) treatment on the respiratory pathway and energy level in postharvest broccoli florets, samples were treated with water (as the control) and with 30 mg/L 6-BA, respectively, and then stored at (15±1) °C and 90%~95% relative humidity. The effect of 6-BA treatment on the exterior quality, total respiration intensity, the change of respiratory pathways, including Krebs cycle (TCA) pathway, pentose phosphate pathway (PPP), cytochrome pathway (CP), and alternate pathway (AP), the accumulation of superoxide anion, as well as the levels of adenosine monophosphate (AMP), adenosine diphosphate (ADP), and adenosine triphosphate (ATP), and the energy status in postharvest broccoli florets were investigated. The results showed that 6-BA treatment delayed the yellowing of broccoli, significantly decreased the total respiration intensity and the activities of CP and PPP, and increased the expression level of AP. In addition, in the late stage of storage (six to ten days), 6-BA treatment reduced the proportion of TCA activity, promoted the accumulation of ATP, and delayed the decrease in the level of energy charge in postharvest broccoli, inhibiting the accumulation of superoxide anion in postharvest broccoli florets. Thus, the inhibitory effect of 6-BA on the senescence of postharvest broccoli florets might be associated with the regulation of respiratory pathways and the maintenance of energy balance in the broccoli tissues.

Key words: broccoli; 6-benzylaminopurine; respiratory pathway; energy level

西兰花 (*Brassica oleracea* L. var. *italica* Planch.) 别名青花菜、花椰菜等, 属十字花科芸苔属甘蓝变种, 营养成分丰富, 并且具有很高的药用价值, 能够预防癌症和心血管等疾病。然而, 西兰花在常温下呼吸旺盛, 易黄化腐烂, 从而严重影响它的食用价值及经济价值。因此, 对西兰花采后保鲜技术进行研究具有现

收稿日期: 2016-07-06

基金项目: 江苏省自主创新项目 [CX (15) 1048]

作者简介: 赵素平 (1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品卫生与安全

通讯作者: 胡花丽 (1980-), 女, 副研究员, 研究方向: 果蔬采后生物学

实意义。

目前, 西兰花采后保鲜技术主要有气调保鲜^[1]、冰温贮藏^[2]和臭氧保鲜^[3]等。而 6-苄基腺嘌呤(6-BA) 作为一种细胞分裂素, 已被广泛应用在蔬菜保鲜方面。采后黄花菜^[4]和绿芦笋^[5]等经过 6-BA 处理均能减少活性氧的积累提高抗氧化能力, 郭香凤等^[6]研究也发现 6-BA 处理可显著抑制西兰花的褪绿黄化和褐变, 较好地保持细胞膜的完整性, 有效地抑制西兰花组织的衰老和品质劣变。但前人研究主要集中在 6-BA 护绿及提高抗氧化方面, 而 6-BA 处理对采后西兰花呼吸代

谢及能荷水平是否有影响研究较少。

呼吸代谢是植物维持生命活动的基本代谢之一,它也是调控果蔬采后衰老的重要途径,并且呼吸代谢模式的改变与细胞、组织或机体的功能和活动状态密切相关。杨秀苹等^[7]研究发现,150 mg/L的6-BA喷洒花芽对呼吸强度及呼吸途径均有影响,有利于打破花芽休眠。刘亭等^[8]发现通过短期厌氧和纯氧处理均提高荔枝果实呼吸强度、ATP含量和交替氧化途径对总呼吸的贡献量,延缓衰老和品质劣变。Li等^[9]研究表明,50% O₂+50% CO₂处理降低采后西兰花呼吸速率,抑制ATP含量及能荷水平的下降,延缓西兰花衰老腐败,延长了贮藏期。然而,6-BA处理对西兰花采后衰老的抑制作用是否与其对组织呼吸代谢的调控有关尚不清楚。因此,本研究分析了6-BA处理对采后西兰花呼吸代谢、能量水平的影响,旨在进一步阐明6-BA处理调控采后西兰花衰老的可能机制,进而为其实际的应用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

西兰花购买于南京众彩批发市场,低温运回试验室。选取无病虫害,无机械损伤,花球紧密的西兰花作为试验材料。

1.2 样品处理

根据预试验结果,选用30 mg/L的6-BA对西兰花进行浸泡处理,以清水浸泡为对照(CK),浸泡10 min后,沥干,西兰花装入4.5 L的带孔保鲜盒(LOCK & LOCK),每盒装20个小西兰花头,每处理重复3次。贮藏温度为(15±1)℃、相对湿度为85%~90%。贮藏期间每隔1 d取样一次,用干净的刀具切取西兰花小花蕾于液氮中速冻,置于-20℃保存,用于相关指标的测定。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 呼吸速率的测定

采用氧电极及抑制剂法进行呼吸速率测定,以氧气消耗速率表示呼吸速率,所用仪器为英国Hansatech公司生产的Oxygraph氧电极自动测定体系。参考潘俨等^[10]的方法,略有改动。各呼吸途径的测定采用专一性抑制剂的方法,EMP(糖酵解途径)专一性抑制剂:10 mmol/L NaF, TCA(三羧酸循环途径)专一性抑制剂:50 mmol/L 丙二酸;PPP(磷酸戊糖途径)专一性抑制剂:10 mmol/L Na₃PO₄; CP(细胞色素途径)专

一性抑制剂:5 mmol/L NaN₃; AP(交替途径)专一性抑制剂:10 mmol/L 水杨羟肟酸(SHAM)。加入上述抑制剂后测定剩余呼吸,根据被抑呼吸即可确定各呼吸途径的所占比例。从每个处理的60朵西兰花上均匀选取西兰花花萼,氧电极反应杯中加入1.5 mL、65 mmol/L、pH 6.8磷酸钾缓冲液运行5 min后,称取0.1 g西兰花花萼放入反应杯,反应温度25.0±0.1℃,转速85 r/min;通过分别加入抑制剂氟化钠、丙二酸、磷酸三钠、叠氮钠和水杨羟肟酸各0.1 mL,分别测定5 min内西兰花在不同途径的耗氧速率以及占总呼吸速率的比例。被抑呼吸所占比例=(基础呼吸-剩余呼吸)/基础呼吸。

用各呼吸途径所占比例表示各呼吸途径的呼吸强度。

1.3.2 超氧阴离子(O₂⁻)产生速率的测定

参考曹健康等^[11]的方法,略有改动。称取0.5 g西兰花样品,加入2 mL、65 mmol/L、pH 7.8磷酸钾缓冲液[包含1 mmol/L 乙二胺四乙酸(EDTA),0.3% TritonX-100,2%聚乙烯吡咯烷酮(PVP)]匀浆混匀,于10000 r/min、4℃离心20 min,收集上清液。取0.5 mL上清液加入0.5 mL、65 mmol/L、pH 7.8磷酸钾缓冲液和0.5 mL、10 mmol/L 盐酸羟胺,混匀后置于25℃保温60 min。然后加入0.5 mL、58 mmol/L对氨基苯磺酸和0.5 mL、7 mmol/L α-萘胺,摇匀后在25℃保温30 min。之后加入等体积的三氯甲烷(萃取色素)混匀后于10000 r/min离心10 min,吸取上层液体,于530 nm处测定吸光值。以KNO₂作标准物,重复测定3次,计算O₂⁻生成速率(nmol/min/g)。

1.3.3 ATP含量和能荷的测定

参照Liu等^[12]的方法,略有改动。称取2 g样品,用8 mL、0.6 mol/L的高氯酸冰浴研磨后,提取30 min,3000 r/min冷冻(4℃)离心20 min,取5 mL上清液迅速用1 mol/L KOH中和至pH 6.5~7.0。冰浴中稳定30 min使高氯酸盐沉淀,8000 r/min冷冻(4℃)离心5 min,取上清液用于液相分析。进样前用0.45 μm微孔滤膜过滤。色谱条件:PDA检测器,Waters C18柱(5 μm,4.6 mm×250 mm),流动相为磷酸缓冲液(50 mmol/L,pH 7.0,含1.5 mmol/L四丁基硫酸氢铵),流速1 mL/min,柱温30℃,检测波长254 nm,进样量20 μL,重复3次,外标法定量,以保留时间定性,峰面积定量。能荷=[ATP+1/2ADP]/[ATP+ADP+AMP],试验重复3次。

1.4 数据统计

采用Origin 8.5软件绘制图表,所有数据为重复

的平均值±标准误, 显著性采用 SPSS 16.0 软件进行邓肯氏多重差异分析 ($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 6-BA 对采后西兰花表型的影响

表 1 6-BA 对采后西兰花表型的影响

Table 1 Effect of 6-BA on the phenotype of postharvest broccoli

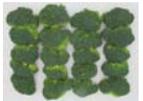
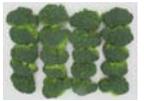
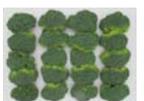
天数/d	处理	
	CK	6-BA
0		
2		
4		
6		
8		
10		

表 1 显示了采后西兰花感官品质的变化。可看出, 在贮藏 4 d 时, 对照组西兰花的部分花蕾开始出现黄化, 而 6-BA 处理组仍保持绿色; 贮藏 6 d 时, 对照组已经全部黄化, 而 6-BA 处理西兰花在贮藏 8 d 时才有部分花蕾黄化; 贮藏 10 d 时, 对照组已出现腐烂, 6-BA 处理仍可保持部分花蕾绿色表型。可见, 6-BA 处理明显延缓了采后西兰花组织的黄化、腐烂症状。

2.2 6-BA 对采后西兰花底物氧化水平代谢途径的影响

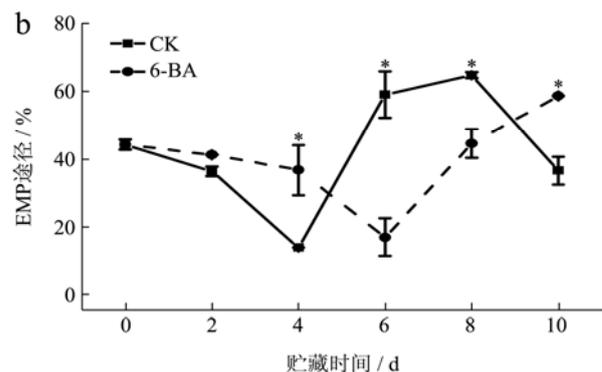
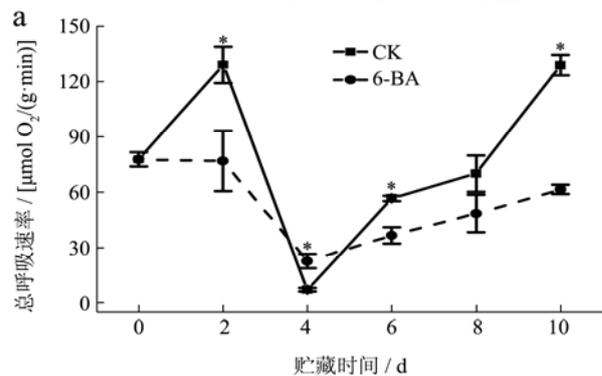
从图 2a 可看出, 6-BA 处理西兰花总呼吸强度与 CK 相似均呈先下降后上升趋势。较 0 d 相比, 在贮藏 4 d 时, CK 和 6-BA 处理西兰花的总呼吸速率分别下降了 94.30% 和 70.20% 且均到达贮藏期的低谷。由图 2a 可知, 西兰花在贮藏后期 (第 6 d~10 d), 总呼吸速率呈上升趋势, 这可能与采后西兰花病原菌的侵染有

关^[13] (见表 1) 除贮藏 4 d 外, 在整个贮藏期间 6-BA 处理西兰花的总呼吸速率均显著低于 CK ($p < 0.05$), 如在 6 d 和 10 d 时, 对照的总呼吸速率分别为 70.16 $\mu\text{mol O}_2/(\text{g}\cdot\text{min})$ 、129.00 $\mu\text{mol O}_2/(\text{g}\cdot\text{min})$, 处理的分别为 48.69 $\mu\text{mol O}_2/(\text{g}\cdot\text{min})$ 、61.61 $\mu\text{mol O}_2/(\text{g}\cdot\text{min})$, 说明 6-BA 处理能降低采后西兰花的总呼吸速率。

图 2b 为采后西兰花糖酵解途径 (EMP) 呼吸途经的变化情况。如图所示, 贮藏前 4 d, 处理和对照组织的 EMP 途径均呈下降趋势, 但 CK 组西兰花的 EMP 途径在第 4 d 后迅速上升, 而 6-BA 处理组的 EMP 途径则在第 6 d 后才明显上升, 且在贮藏第 6 d~8 d 期间, 6-BA 处理显著降低了组织的 EMP 途径 ($p < 0.05$)。但在贮藏 10 d 时, CK 组 EMP 途径迅速下降, 而 6-BA 处理维持了采后西兰花中较高的 EMP 水平。

图 2c 显示在整个贮藏期内, 处理和对照组织的三羧酸循环途径 (TCA) 比例均总体呈上升趋势。在贮藏第 4 d 时, 6-BA 处理组织中的 TCA 比例高于 CK, 然而贮藏 8 d 和 10 d 时, 对照 TCA 比例分别为 102.46% 和 111.59%, 而处理的 TCA 比例分别为 71.65% 和 87.46%, 这表明, 在贮藏后期 (6~10 d) 6-BA 处理显著降低了西兰花 TCA 呼吸途径的水平 ($p < 0.05$)。

由图 2d 可知, CK 组和 6-BA 处理组西兰花的磷酸戊糖途径 (PPP) 所占比例在贮藏期间总体呈上升趋势, 分别由 63.00% (贮藏 0 d) 提高到 97.00% 和 71.00% (贮藏 8 d)。除贮藏第 4 d 外, 6-BA 处理组织中的 PPP 比例显著低于 CK ($p < 0.05$), 说明 6-BA 处理可不同程度降低西兰花 PPP 途径的表达量。



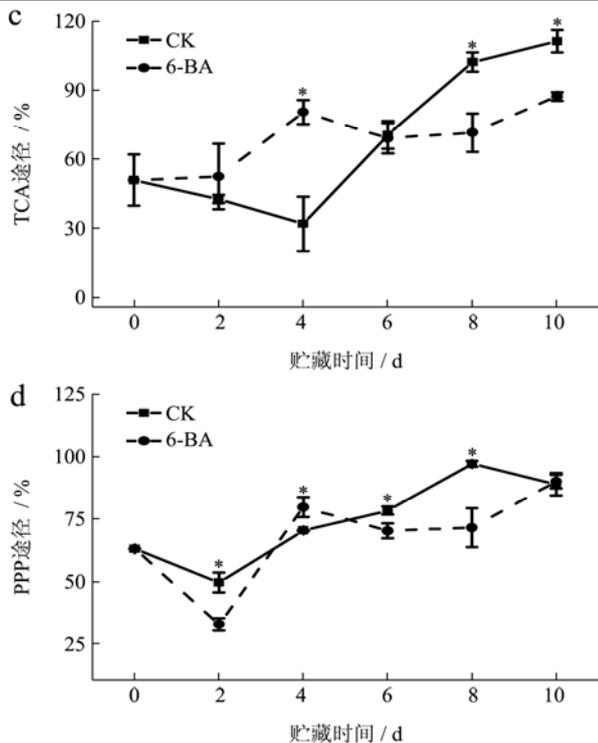


图2 6-BA对西兰花底物氧化水平代谢途径的影响

Fig.2 Effect of 6-BA on the pathway of substrate oxidation in postharvest broccoli

注: 星号(*)代表0.05水平上有显著差异。下同。

2.3 6-BA对采后西兰花电子传递末端途径的影响

细胞色素氧化途径(CP)是呼吸链中电子传递链的一个主要途径,它的表达和总呼吸强度密切相关。如图3a所示,在整个贮藏期间,6-BA组和CK组西兰花的CP途径表达量总体呈下降趋势。与CK相比,6-BA处理显著降低了西兰花的CP耗氧速率并维持在较低水平($p < 0.05$),如在贮藏第2d、8d和10d时,处理组的CP耗氧速率分别是CK组的16.45%、69.12%和38.76%,说明6-BA处理可抑制采后西兰花细胞色素途径的运行。

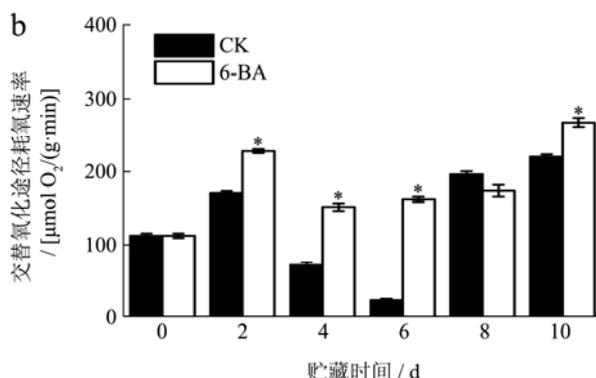
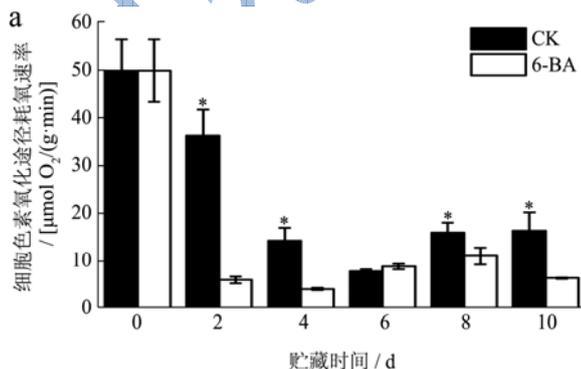


图3 6-BA对采后西兰花电子传递末端途径的影响

Fig.3 Effect of 6-BA on the pathway of electron transport in postharvest broccoli

交替氧化途径(AP)是电子传递中另一条呼吸途径。由图3b可知,同CP途径相反,在贮藏期间,6-BA处理组和CK组西兰花的AP耗氧速率总体呈两段上升趋势。例如,与贮藏0d相比,在贮藏第2d时,6-BA处理西兰花的AP上升了近乎2.00倍;贮藏4d后,所有处理西兰花组织的AP出现二次上升。与CK相比,除贮藏8d外,在整个贮藏期间6-BA处理显著提高了西兰花组织AP的运行水平($p < 0.05$)。

2.4 6-BA对采后西兰花超氧阴离子(O₂⁻)产生速率的影响

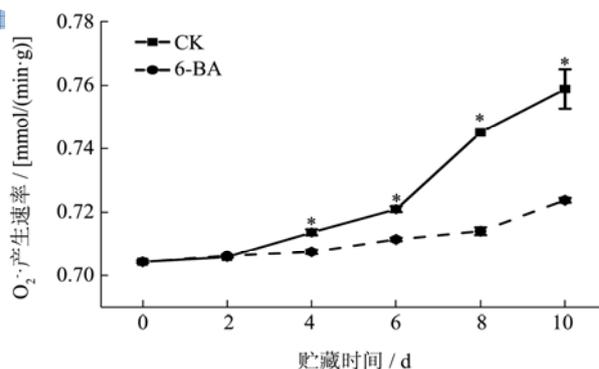


图4 6-BA对采后西兰花超氧阴离子(O₂⁻)产生速率的影响

Fig.4 Effect of 6-BA on the generation rate of superoxide anion radical in postharvest broccoli

由图4可知,在整个贮藏过程中,6-BA处理组和CK组西兰花组织中的O₂⁻产生速率均明显上升。然而,在贮藏4~10d期间,与CK相比,6-BA处理显著减缓了西兰花中O₂⁻的快速积累($p < 0.05$)。贮藏第10d,对照和处理的O₂⁻产生速率分别为0.76 nmol/(min·g)、0.72 nmol/(min·g),与0d相比,第10d时对照组O₂⁻产生速率约是处理组的2.80倍,这表明

6-BA 处理可减缓采后西兰花 $O_2\cdot^-$ 的产生速率, 减少 $O_2\cdot^-$ 的快速积累。

2.5 6-BA 对采后西兰花能量水平的影响

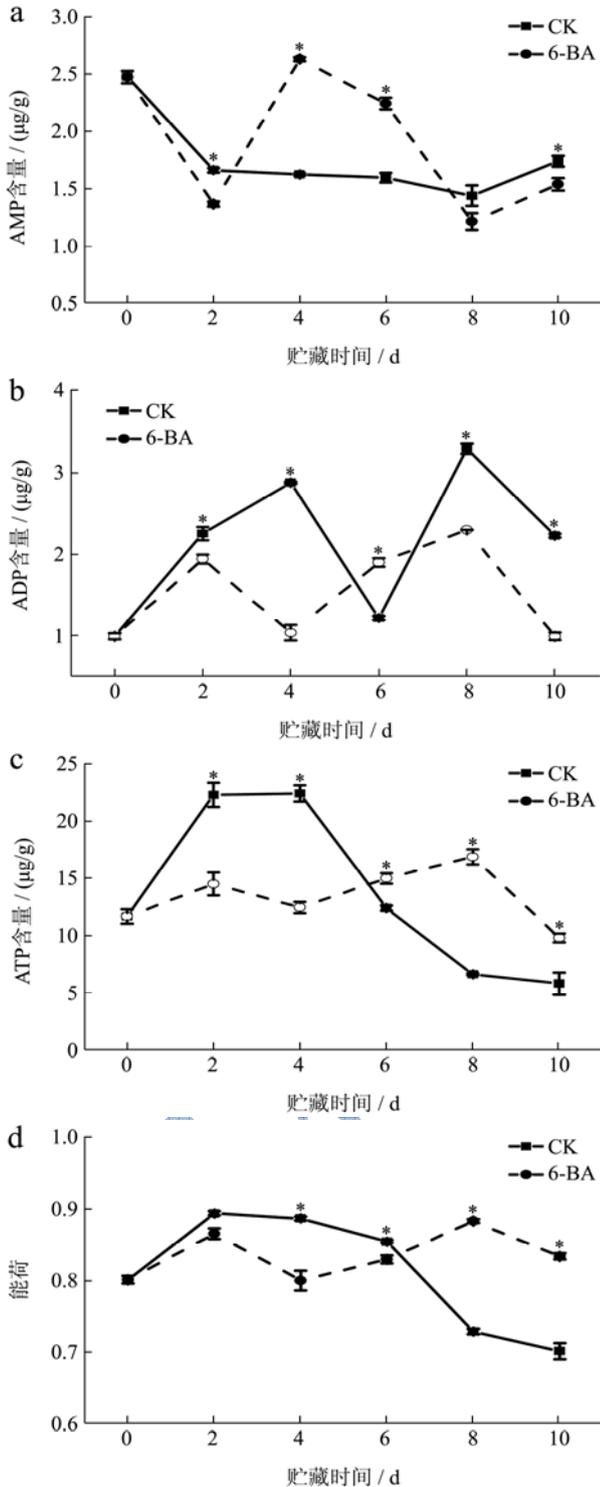


图5 6-BA 对采后西兰花能量代谢的影响

Fig.5 Effect of 6-BA on energy metabolism in postharvest broccoli

由图 5a 可看出, 除贮藏 4 d、6 d 外, 6-BA 处理西兰花的 AMP 含量均显著低于 CK ($p < 0.05$), 表明

6-BA 处理保持西兰花较低的 AMP 含量主要在贮藏前期 (0~2 d) 和贮藏后期 (8~10 d) 起显著作用。从图 5b 可知, 6-BA 处理组与 CK 组 ADP 含量在贮藏过程中变化趋势相似, 除贮藏 6 d 外, 6-BA 处理组西兰花的 ADP 含量显著低于对照组 ($p < 0.05$), 如在第 10 d 时, 对照和处理的 ADP 含量分别为 2.23 $\mu\text{g/g}$ 和 0.99 $\mu\text{g/g}$ 。图 5c 显示, 贮藏前 4 d, 6-BA 处理西兰花的 ATP 含量显著低于 CK, 而在贮藏 6 d、8 d、10 d, 6-BA 处理组 ATP 含量分别是 CK 组的 1.21、2.54 和 1.68 倍。这说明, 6-BA 处理在西兰花贮藏前期 (0~4 d) 维持了较低的 ATP 含量, 但促进贮藏后期 (6~10 d) 西兰花 ATP 含量的积累。图 5d 显示了采后西兰花组织中能荷的变化情况。可看出, CK 组西兰花能荷值随着贮藏时间的延长逐渐下降, 贮藏第 10 d 时与第 2 d 相比能荷值下降了 87.65%, 而 6-BA 处理组西兰花的能荷值呈先升高后下降的特点, 在第 8 d 时达到最大值 0.88, 之后有所下降, 但其在贮藏 8 d~10 d 期间显著高于对照 ($p < 0.05$)。说明 6-BA 处理减缓西兰花能荷值的下降主要在贮藏后期 (6~10 d) 发挥积极作用。

3 讨论

3.1 6-BA 处理对采后西兰花黄化及总呼吸强度的影响

果蔬的营养物质消耗随呼吸速率的升高而加快, 抑制采后果蔬的呼吸活动可以有效保持其品质和延缓衰老。有研究发现 6-BA 处理虽然刺激乙稀的产生但同时降低组织对乙稀的敏感度, 抑制其呼吸速率, 延缓衰老^[14]。本实验也表明, 在整个贮藏期间, 6-BA 处理可降低采后西兰花的总呼吸强度, 延缓西兰花黄化衰老, 这与郭香凤^[6]等研究一致。

3.2 6-BA 处理对采后西兰花呼吸途径的影响

EMP、TCA、PPP 途径是底物氧化水平上基本的三条呼吸途径。EMP 途径及 TCA 循环是植物生命活动的主要能量来源。本试验表明, 在贮藏 4 d 前, 6-BA 处理西兰花的 EMP-TCA 呼吸途径高于对照, 这可能有助于处理组西兰花在贮藏前期能量的积累, 而在贮藏 4 d 后 TCA 途径则显著低于对照, 因为 6-BA 对采后西兰花叶绿素降解的影响主要体现在贮藏后期 (见图 1), 所以贮藏后期 6-BA 对 TCA 途径的抑制作用有利于降低西兰花呼吸速率减缓组织的衰老进程, 该结果与总呼吸强度的变化一致。植物受病原菌感染时呼吸作用增强, PPP 途径也明显增强^[13]。本试验表明,

在贮藏后期, 6-BA 处理西兰花的 PPP 呼吸途径比例低于对照, 说明 6-BA 处理提高了西兰花抗病能力, 同时该途径对总呼吸强度变化也具有贡献作用。这与 Li 等^[9]的研究结果一致。这些结果说明 6-BA 处理主要通过影响 TCA 和 PPP 呼吸途径而调控组织的总呼吸速率。

细胞色素途径和交替途径是电子传递链上主要的两条呼吸途径。当外界胁迫引起细胞内氧压升高, 交替途径就会参与形成抗氧化防御体系, 保护果蔬细胞免受氧化损伤, 维持正常的能量代谢, 提高自身抵御逆境的能力^[15]。本研究表明, 6-BA 处理后, 在整个贮藏期间 CP 途径耗氧速率总体呈下降趋势且显著低于对照, 而 AP 途径耗氧速率则呈两段上升趋势且显著高于对照。通常 AP 途径可作为电子传递链的一个支路, 从而降低组织内活性氧水平的积累^[16]。因此, 我们进一步分析了采后西兰花组织中 O_2^- 含量的变化, 结果发现 6-BA 处理显著减缓了采后西兰花组织内 O_2^- 的积累, 这可能与组织电子传递链流向 AP 途径有关。这些结果表明, 6-BA 处理通过降低 CP 途径及提高 AP 途径的运行而影响组织的总呼吸强度。

另外, 呼吸途径与呼吸代谢密切相关。杨秀萍等^[7]研究表明 6-BA 处理提高了花芽呼吸强度, 并使呼吸代谢途径中的 TCA 和 PPP 比率升高, 以利于花芽打破休眠提早萌发。而本文研究结果显示, 6-BA 处理降低了采后西兰花呼吸强度, 尤其在贮藏后期降低了呼吸代谢途径中的 TCA 和 PPP 比率, 实验结果不一致可能是处理方式及物种间的差异造成的。

3.3 6-BA 处理对采后西兰花能量水平的影响

细胞的能量供应在果蔬采后成熟衰老中起关键作用。细胞能量耗竭对果蔬成熟、衰老、病菌感染等都有不利影响。本研究结果表明, 贮藏后期 (6~10 d), 与 CK 组比较, 6-BA 处理组西兰花的 ATP 含量和能荷均维持在较高的水平 (见图 5c 和 5d), 说明 6-BA 延缓采后西兰花黄化腐败可能与保持较高的能荷状态有关。有研究表明, 能量缺失会促进活性氧积累, 而维持细胞内的能量代谢水平可有效延缓果蔬的衰老^[17]。本试验表明, 6-BA 处理可延缓采后西兰花 O_2^- 的积累, 这可能与 6-BA 处理西兰花在贮藏后期 (6~10 d) 保持较高的能荷水平有关。Hu 等^[18]研究也发现, 较高的能荷状态可以延缓采后空心菜组织的黄化。由图 2a 可知, 6-BA 处理组总呼吸强度较 CK 组具有较低水平, 而呼吸强度降低可减少能量的消耗。有研究表明, 交替途径的加强可通过调控 ATP 的合成来维持能荷的稳定和电子传递链的正常运行, 使果蔬在不同环

境胁迫下稳定生长^[19]。交替氧化途径在调控活性氧的生成量和细胞能量平衡方面发挥重要作用。而 6-BA 以一定浓度作用植物时会对交替途径产生强烈作用^[20]。本文结果表明, 6-BA 处理提高了交替途径对总呼吸的贡献量 (见图 3b), 这可能是 6-BA 处理西兰花在贮藏后期仍保持较高 ATP 含量及能荷水平的原因。

可见, 在底物水平上, 6-BA 主要通过降低 TCA、PPP 呼吸途径的运行比例减缓了采后西兰花的总呼吸强度; 在电子传递链水平上, 6-BA 处理提高 AP 途径的运行比例抑制了采后西兰花组织内 O_2^- 的积累, 从而降低其对细胞膜的破坏; 同时, 6-BA 处理对采后西兰花衰老的调控与其维持贮藏后期组织内较高的能荷水平亦有关。

参考文献

- [1] 郭衍银, 李玲, 陈东, 等. O_2 联合 CO_2 气调对西兰花活性氧代谢及保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(24): 304-308
GUO Yan-yin, LI Ling, CHEN Dong, et al. Effects of O_2 combined with CO_2 controlled atmospheres on reactive oxygen species metabolism and quality preservation of broccoli (*Brassica oleracea* L.) [J]. Food Science, 2013, 34(24): 304-308
- [2] 林本芳, 鲁晓翔, 李江阔, 等. 冰温贮藏对西兰花保鲜的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(19): 312-316
LIN Ben-fang, LU Xiao-xiang, LI Jiang-kuo, et al. Effect of ice-temperature storage on the freshness retaining of broccolis [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(19): 312-316
- [3] 徐斐燕, 蒋高强, 陈健初. 臭氧在鲜切西兰花保鲜中应用的研究[J]. 食品科学, 2006, 27(5): 254-257
XU Fei-yan, JIANG Gao-qiang, CHEN Jiang-chu. Study on ozone preservation of fresh-cut broccoli [J]. Food Science, 2006, 27(5): 254-257
- [4] 龚吉军, 谭兴和, 夏延斌, 等. 小袋包装气调和 6-BA 对黄花菜采后生理变化的影响[J]. 食品科学, 2004, 25(6): 175-178
GONG Ji-jun, TAN Xing-he, XIA Yan-bin, et al. Effects of MAP and 6-BA treatment on physiology of post-harvesting of day-lily flower [J]. Food Science, 2004, 25(6): 175-178
- [5] An J, Min Z, Lu Q, et al. Effect of a prestorage treatment with 6-benzylaminopurine and modified atmosphere packaging storage on the respiration and quality of green asparagus spears [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(4): 951-957
- [6] 郭香凤, 于明, 刘洪亮, 等. 6-BA 处理对最小加工西兰花生理和品质的影响[J]. 农产品加工, 2008, 8: 11-16
GUO Xiang-feng, YU Ming, LIU Hong-liang, et al. Effects

- of 6-BA treatment on physiology and quality of minimally processed broccoli [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2008, 8: 11-16
- [7] 杨秀苹.油桃花芽自然休眠期间呼吸机制的研究[D].合肥:安徽农业大学,2004
- YANG Xiu-ping. Study on respiration of dormancy nectarine flower buds [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2004
- [8] 刘亨,钱政江,杨恩,等.呼吸活性和能量代谢与荔枝果实品质劣变的关系[J].果树学报,2010,27(6):946-951
- LIU Ting, QIAN Zheng-jiang, YANG En, et al. Respiratory activity and energy metabolism of harvested litchi fruit and their relationship to quality deterioration [J]. Journal of Fruit Science, 2010, 27(6): 946-951
- [9] Li L, Lv F Y, Guo Y Y, et al. Respiratory pathway metabolism and energy metabolism associated with senescence in postharvest Broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) florets in response to O₂/CO₂ controlled atmospheres [J]. Postharvest Biology & Technology, 2016, 111: 330-336
- [10] 潘俨,车凤斌,董成虎,等.模拟运输振动对新疆杏呼吸途径和品质的影响[J].农业工程学报,2015,31(3):325-331
- PAN Yan, CHE Feng-bin, DONG Cheng-hu, et al. Effects of simulated transport vibration on respiratory pathways and qualities of Xinjiang apricot fruit [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(3): 325-331
- [11] 曹建康,姜微波.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007
- CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo. The instruction of physiological and biochemical experiment on postharvest fruits and vegetable [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007
- [12] Liu H, Jing Y, Luo Y, et al. A simple and rapid determination of ATP, ADP and AMP concentrations in pericarp tissue of litchi fruit by high performance liquid chromatography [J]. Food Technology & Biotechnology, 2006, 44(4): 531-534
- [13] Rojas C M, Senthilkumar M, Tzin V, et al. Regulation of primary plant metabolism during plant-pathogen interactions and its contribution to plant defense [J]. Frontiers in Plant Science, 2014, 5(4): 427-436
- [14] Tian M S, Davies L, Downs C G, et al. Effects of floret maturity, cytokinin and ethylene on broccoli yellowing after harvest [J]. Postharvest Biology & Technology, 1995, 6(1-2): 29-40
- [15] 徐飞,袁澍,梁厚果,等.交替氧化酶和解偶联蛋白在植物线粒体中的作用及其相互关系[J].植物生理学报,2009,45(2): 105-110
- XU Fei, YUAN Shu, LIANG Hou-guo, et al. The roles of alternative oxidase and uncoupling protein in plant mitochondria and their interrelationships [J]. Plant Physiology Communications, 2009, 45(2): 105-110
- [16] Maxwell D P, Wang Y, Mcintosh L. The alternative oxidase lowers mitochondrial reactive oxygen production in plant cells [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1999, 96(14): 8271-8276
- [17] Yi C, Qu H X, Jiang Y M, et al. ATP-induced changes in energy status and membrane integrity of harvested litchi fruit and its relation to pathogen resistance [J]. Journal of Phytopathology, 2008, 156(6): 365-371
- [18] Hu H L, Liu D, Li P X, et al. Hydrogen sulfide delays leaf yellowing of stored water spinach (*Ipomoea aquatica*) during dark-induced senescence by delaying chlorophyll breakdown, maintaining energy status and increasing antioxidative capacity [J]. Postharvest Biology & Technology, 2015, 108: 8-20
- [19] 于芹.自然休眠诱导期油桃芽体抗氧呼吸代谢研究[D].泰安:山东农业大学,2008
- YU Qin. Studies on cyanide-resistant respiration of nectarine buds during endodormancy induction [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2008
- [20] 宋松泉.高等植物呼吸代谢的调节[J].长沙理工大学学报(社会科学版),1988,2:119-124
- SONG Song-quan. Respiratory regulate metabolism in higher plants [J]. Changsha University of Technology (Social Science Edition), 1988, 2: 119-124